台北帝国大学と京都大学における初期の 加速器開発と原子核物理学研究(後編)

竹腰 秀邦

Early Period of Particle Accelerator Development and Nuclear Physics Experiments at Taihoku Imperial University and Kyoto University (2/2)

Hidekuni TAKEKOSHI

5. サイクロトロンの再建

1951年5月にサイクロトロンの発明者のローレン ス教授が来日し、日本政府に対し原子核物理研究の再 開を促す働きがけが行われた.木村教授はサイクロト ロンの再建を決意し、京大の当時の鳥養総長や内野化 学研究所長の協力を得て建設計画が立案された.その 目的は"原子核物理学の発展に寄与することと、また 入手の難しい放射性同位元素を多量製造して、学界及 び産業界におくり、それらの発展に貢献する."とい うものであった.

この計画は政府の承認を経て、1952年以降約 6,000万円の政府予算が計上された.計画を支援する 原子核研究協会が設立され、これを通じて各業界から 2,200百万円の寄付金の援助を受けた.また当時の高 山京都市長の事業に対する賛同を得て、京都市所有の 蹴上の旧発電所の建物がサイクロトロンの設置場所と して提供された(写真8,9).この建物は我が国の最 初の水力発電所の二代目の建物で土地は関西電力が所 有していた. 1952年サイクロトロンの設計が旧荒勝研究室のメンバーにより始められた.木村,植村,園田,清水,柳父,石割,小亀,片瀬,隈部,山下,竹腰,三宅,池上,富士田の諸氏が参加し,いくつかの設計グループが結成された.

その当時世界各所で建設されたサイクロトロンの関



写真9



写真 8



写真10 サイクロトロンで加速された水素イオンビーム



写真11

連リポートや設置状況に関するレビュー¹⁷⁾等を検討 し,設計にあたっては MIT のサイクロトロン¹⁸⁾など を参考にした.磁石のポール径 105 cm の周波数固定 型のサイクロトロンで重水素イオンを 15 MeV に加 速することを目標にした.この年の暮には設計が完了 し分割して数社に発注された.1955 年には総合組み 立てが完了し 12 月にはビームを外部に取り出した. 写真 10 は加速された水素イオンビームを示す.また 内部加速ビームにより放射性同位元素の製造が始めら れ各所に配布された.その後サイクロトロンの周辺の 放射線シールド,核反応実研室,二階フロワーの間仕 切工事が 1959 年まで行われ,1966 年から本格的な 原子核物理の研究がはじめられた¹⁹⁾(写真 11).

6. サイクロトロンの概要

6.1 電磁石

磁石のヨークは平炉製の低炭素鋼、ポールはアーク 炉で製造後鍛造した超低炭素鋼で製作された. ポール は基部の直径126 cm,厚さは70 cm で先端は105 cm に絞られている.上下のポール先端には直径 105 cm で厚さ6 cm のポールチップが6 mm のシムギャ ップをおいて取り付けられている.シムギヤップに厚 さ 0.35 mm の珪素鋼板を入れ磁界変動を補正する. ポールチップの先端は周辺部で幅2cmにわたり7 mm 厚くなっている.上下の磁極間隔は 13.5 cm でこ の間に dee が挿入される.磁石を励起する上下のコ イルは 30×2.5 mm の銅線が 1190 回巻かれていて, 75 kW 出力の直流モーターで電流を流す. 電流のエ ラー信号を1.5 kWの小型制御モーターを通して75 kW のモーターの界磁コイルにフイードバックする. これにより磁石電流は 0.02% の安定度を得ている. 磁石の鉄部分の重量は71.3トン,コイル重量8.5ト



図3 サイクロトロンの平面図
A)磁石, B)コイルタンク, C) dee 槽, DS)左側 dee, DE)右側 dee, E)電気容量補正電極, F)電 流測定プローブ, G)内部ターゲット, H)ビーム 偏向装置, I)イオンソース, JS)左側空洞, JE) 右側空洞, K) dee-stem, L)コンデンサ, M)カ プリングループ, N)電力伝送同軸管, O)空洞移 送用レール, P)油拡散ポンプバルブ, Q) dee-stem 支持装置, R)ビーム偏向装置高圧電源導入 口

ンで総重量は80トンである.

6.2 共振空洞,加速槽

図3にサイクロトロンの平面図を示す.加速槽と一 対のdee 共振空洞により構成されている.共振空洞 タンクは直径60 cm,長さ270 cmの銅管で,一端は dee を内蔵する加速槽に接続され,他端は蓋で仕切ら れ真空を保っている.銅製のdee-stemは直径20 cm で,stemの他端は調節機能を持つ支持金具によりタ ンク蓋に絶縁碍子を通し保持され,deeの位置を正確 に保っている.加速槽は黄銅板を組み立てた蝋付け構 造で,上板下板にポールチップがはめ込まれ磁石の間 隙に挿入される.加速槽と2 つの共振空洞はそれぞ れ2,500 l/秒の油拡散ポンプで排気される.機械部分 の大半は神戸製鋼所で製作された.

6.3 共振回路と発振器

発振器は神戸工業で製作された.大出力の短波発振 管のグリッドを接地しプレートに共振回路を接続し, 共振回路に発生した電力の一部をカソードにフイード

-19-

バックする自励発振方式を採用した. 共振回路は 1/4 波長モードの同軸管空洞を用いた.空洞内のdeestem とタンク間は、放射状に接続された8ケのコン デンサにより高周波的に短絡される. このコンデンサ の電気容量の総計は 6000 pf である. このコンデンサ を動かすことにより空洞の共振周波数を11 MHzよ り14 MHz まで変えることができる. 空洞のQ値は 4000 である.発振器に 100 kW の直流入力により, dee-dee 間に 90 kV (ピーク値) の電圧が発生する. dee は静電的にタンクと絶縁されているのでバイアス 電圧をかけることができる.バイアス電圧が0の場 合自励発振の立ち上がり時に、deeの電圧が数100V に達すると stem とタンク間に多重電子衝突による放 電が起こり発振の立上が停止する. 空洞の真空度が 10⁻⁴ Torr より良い場合に-600 Vのバイアス電圧を かけると放電が起こることなく自励発振が立ち上が る.

発振管は空冷のRCA5671の2本を並列に使用し た. プレート出力は, 外径 30 cm で内管径 10 cm, 長さ8.4m,の銅製同軸管により左側の空洞に設けら れたカップリング・ループの一端に伝送される. 同軸 管のカップリング・ループの他端には同じ径の開放端 末の同軸管を接続し、長さを調整し発振管に高周波電 力が戻らないようにする. 左側の空洞に高周波電力が 注入されると左側の dee に電圧が発生し、次いで dee-dee 間の電気容量を通して右側の空洞に高周波電 力が伝わり右側の dee に電圧が発生する. 左右の dee に発生する電圧値は同じだが位相差が0度と180度 のモードがある.空洞の共振周波数が13 MHzの場 合二つのモードの周波数の差は 90 KHz でイオン加速 には180度のモードを使用する.右側の空洞のカッ プリング・ループにより高周波電力の一部が取り出さ れ同軸管により3極管のカソードにフイードバック され自励発振が持続する.この同軸管の外径は10 cm で内管径は3cm で長さは8.6m である. このカップ リング・ループの他端にはコイルと可変コンデンサが 接続されフイードバック量を調節する.

6.4 dee, イオン源, イオン加速, ビーム偏向

dee は半径 51 cm の 143 度の半円形で中心部の厚 さ 6.4 cm で, 43 cm 径の部位で厚さ 5.4 cm である. dee の材質は 2 mm の厚さの銅板で内面には 10 mm 径の水冷銅管が半田付けされている. dee の上下の縁 の中心には Cu-W 製の嘴状の電極が取り付けられて いる.

イオン源の電子銃でアークを立てる低電圧アーク型 でアーク槽の細孔から出たイオンを嘴状の電極により 効率よく引き出す. イオンがサイクロトロン加速され 47 cm の軌道に達すると dee 内にある偏向装置に入り 軌道が曲げられ外部に取り出される. 偏向装置は 85 度の円弧状のビーム分離板と 7 mm 間隔をおいて併行 する同形の偏向電極からなる. dee-dee 間の電圧 115.5 kV で,偏向電極に-36 kV の電圧をかけると, dee 中心から 51 cm の位置に置かれている偏向装置出 口を通過できるビームの割合は 40% になる. 偏向 ビームが 90 μ A を超えると分離板と偏向電極間に放 電がおこるのでこれが偏向ビーム電流の限界になる.

6.5 ビーム外部取り出し, 散乱槽

原子核物理の実験のためのビームをサイクロトロン から隣の原子核反応室に導くため、一対の口径 12 cm,奥行き 25 cm のQ磁石をサイクロトロンに近接 して設置した.Q磁石で集束したビームを 2 m のコ ンクリート遮蔽の孔を通し原子核反応室の散乱槽に導 く.散乱槽でのビームの幅は 7 mm,高さは 9 mm で ある.散乱槽は半径 52 cm の真空容器で内部には多 重原子核乾板支持台や放射線カウンター回転支持台な どが設けられている.1961年には次の性能が得られ た.

水素分子イオン エネルギー 7.5 MeV

外部取り出し電流 90 µA 反応槽電流 0.3 µA 重水素イオン エネルギー 15 MeV

外部取り出し電流 90 µA 反応槽電流 0.3 µA ヘリウムイオン エネルギー 30 MeV

外部取り出し電流 3 µA 反応槽電流 0.01 µA

6.6 サイクロトロンによる研究

1966年から1974年にわたり化研サイクロトロン 研究施設のメンバーや,理学部のメンバーや毎年入学 する物理学科の大学院生により原子核物理の研究が活 発に行われた.成果は数十の研究論文に発表されてい る.これらの研究は柳父教授によりレビューされてい る²⁰⁾.引用された主な研究テーマを列挙すると

- a) α粒子の弾性散乱や非弾性散乱の研究
- b) 重陽子の弾性散乱や非弾性散乱の研究
- c) 重陽子の核反応の研究
- d) 陽子, α粒子による核反応の研究
- e) 三体核反応の研究
- f) 物質の高速粒子に対する阻止能の精密測定
- g) 重陽子核反応による残留核の核化学手段によ る研究(京大エネルギー研究所の西教授等)

その他生物学や医学の研究のためのヂオアイソトー プの製造も盛んに行われたが,それ等の詳細について は把握できない.

6.7 サイクロトロンの閉鎖

サイクロトロンは10年間の定常運転後次第に故障 が増え修理に長時間を要するようになって来た. 1967年にはサイクロトロンの更新が必要と判断され 改造計画が始められた.1969年の暮にビーム偏向装 置の故障により加速ビームをサイクロトロンの外に取 り出すことが出来なくなり,1970年の3月にサイク ロトロンを閉鎖した.1年間の放射能の冷却後サイク ロトロンを分解した.

7. サイクロトロンの改造

サイクロトロンの改造が植村,福永,柿木,柳父, 藤原,大沢,富士田,宮永,Nguyen諸氏によりおこ なわれた²¹⁾.この計画は経費を押え2年間位で完成 させることを前提としたので,AVF磁界によるイオ ンの強収束等は見送られた.計画の骨子は

- a) 水素,重水素,αに加えて³He,重イオンの加 速
- b) 広い範囲のエネルギー加速
- c) ビーム強度を5倍にあげ0.1%のエネルギー幅 を得る.
- d) 運転,整備の自動化を図り安定した性能を得る.

8.構造

8.1 磁石

旧サイクロトロンの磁石をそのまま使用した(写真 12). ただしシム間隔を6mmから1.6mmに狭めた 結果ポールチップ間隙は135mmから144mmに広 がった.イオン加速ができる磁場範囲は1.5Tから 1.75Tまでで,1.5T以下ではポール周辺部で磁場が 盛り上がるためイオンが上下に発散して加速が行えな い.コイル電流の安定化装置は新しく作られた²²⁾.

8.2 共振空洞, 真空槽, dee, ダミー dee

図4に平面図を示す.改造サイクロトロンは単一 deeシステムで前のサイクロトロンの2倍のdee電圧 が必要になる.dee,ダミーdeeを内蔵する真空加速 槽は,前サイクロトロンと異なり分解可能な構造であ る.加速槽の上下の蓋にポールチップをはめ込み,内 面は無酸素銅板で覆っている.加速槽と共振空洞の接 合部に22インチロ径の油拡散ポンプが取り付けられ ている.共振空洞の外側のタンクは直径1.2mで, 18mmの厚さの無酸素銅板を巻いた構造で,表面は 5µmの精度の旋盤加工で仕上げられている.直径40 cmのdee-stemの表面は無酸素銅板が巻かれたステ ンレス鋼管で5µmの精度の旋盤加工が施されている.



写真12



図4 改造サイクロトロンの平面図
A)磁石, B)コイルタンク, C) dee槽, D) dee,
E)ダミー dee, F)ビーム偏向装置ビーム分離板,
G)同偏向電極, H)位相選別器, I)イオンソース,
J)電気容量補正電極, K)結合コンデンサ, L)インダクタンス補正リング, M)磁気チャンネル,
N)ブースター油拡散ポンプ, O)主油拡散ポンプ,
P)ビームプローブ, Q) dee-stem, R)共振空洞,
S)短絡銅板, T) dee 槽と共振空洞の接合部, U)
高周波発振器, V)電圧ピックアップ電極, W)覗き窓, X)ロータリーポンプ(3,000 l/分), Y)支流ポンプ, Z)ロータリーポンプ(300 l/分), He)
ヘリウムリーク検出器, SP)ショート銅板, PC)
空圧接触子

dee-stem は共振空洞タンクの端の蓋に正確に支持されている.

この共振空洞全体の表面積は40 m²で体積は4.7 m³で排気速度10,000 *l*/秒の22 インチロ径の油拡散 ポンプで排気して2×10⁻⁶ Torr の真空を得ることが できる.

dee と相対するアース電位のダミー dee によってイ オン加速を行う. dee は dee-stem に対して加速ビー ムの取り出し方向の関係から 80 度傾いている. dee 表面からポールチップ表面までの間隙は 42.5 mm で 120 kV まで放電を起こさない. イオンが通過する dee の間隙は 20 mm である. 共振同軸空洞のタンク

-21 -

の外側は40 cm 径,長さは2.2 m で,タンクと deestem の間にドーナツ状の短絡銅板を入れその位置を 移動することにより空洞の共振周波数を10 MHz か ら14 MHz まで変えることができる.短絡銅板の外 側に48 ケと内側には16 ケの接触子が取り付けら れ,空圧によりタンク内面と dee-stem 表面に押しつ け良い接触を得る.

運転の際には空洞に取り付けられた出し入れ移動電 極板や回転ループの操作により,周波数の自動安定化 を行う.空洞のQ値は10MHzで10,900であった. deeに13MHzで100kVの電圧を発生させると共振 空洞に120kWの熱が発生するが,純水の循環冷却に より温度上昇を5℃以下に抑え,運転の際の周波数変 動を2kHzに抑えることができた.

8.3 発振器

大出力水冷管 7T40 による自励発振方式が採用され た.7T40のプレートに発生した高周波電圧は直接空 洞のカップリング電極に伝えられ空洞を励振する. 7T40 のグリッドには調整可能な同調回路がありこれ により自励発振を立ち上げる.しかし自励発振の成長 時に dee の電圧が数 100 V に達するとタンク内の放 電により発振が成長しない. この放電を避けるために 9T82 を使用する小型発振器の出力を空洞に送り込み deeの電圧が1000 V 以上になると7T40 による自励 発振に切り替える. その後小型発振器を止めても自励 発振は成長する. サイクロトロン運転時に放電が起こ ると7T40の入力を中断させ発振を停止させる. 短時 間をおいて小型発振器を起動し同調を取り dee の電 圧を立ち上げる.その後7T40による自励発振に切り 替え発振を復帰させる. これらの動作はシーケンス回 路により自動的に行うことができる.

8.4 イオンの加速,外部取り出し

イオン源は低電圧アーク型でモリブデン製のアーク 槽の上部には電子銃,下部には反射電極が配置されて いる.アーク槽の側面にあけられた高さ4mm幅2.2 mmの孔からイオンは取り出される.アーク槽内の真 空度が2Torrの時にイオン発生が最適でこれにより 全体の真空系は0.4×10⁻⁶Torrの圧力上昇を伴う.

イオン源を出たイオンは最初 dee の中央に付けら れた嘴状電極により加速され,その後 dee とダミー dee の間の高周波電界によりサイクロトロン加速され る.ビームを取り出すための軌道偏向装置はダミー dee 側のイオン軌道上に置かれている.偏向装置は 60 度の円弧状のタングステン製のビーム隔離板とこ れに併行する水冷銅板製偏向電極より構成されてい る.偏向電極は長い絶縁碍子に支えられ-100 kVの 高圧電源に接続されている. 偏向装置を出たビームは 磁気チャネルを通過し水平方向の広がりが押さえられ る²³⁾.

重水素イオンを15 MeV に加速する場合, 偏向装置の入り口をイオン軌道半径53 cm に置き, 偏向電極の電圧を82 kV にすると拡がりが8 度のビームが40%の効率で取り出される.

9. サイクロトロンの運転と利用と閉鎖

1973年頃から水素イオンで6~7.3 MeV,重水素 イオンで12~15 MeV の加速により各種の実験が行 われた.³He の加速を試みたがイオン源のイオン発生 量が少ないことと,高い dee 電圧が得られなかった 等の原因で充分な収量が得られなかった.このサイク ロトロンは原子核物理の研究から医学,生物学,工学 の研究に軸足を移した.従来の理学部物理の院生に加 えて工学部原子核工学科の院生が研究に参加した.ま た医学部放射線科の安部教授や放射線生物研究セン ターの佐々木教授との共同研究が行われた.

その幾つかを述べると24)

- a) プロトンとα粒子の後方散乱を利用する物質
 表面の構成元素の分析²⁵⁾
- b) プロトン励起特性 X 線による物質表面の構成 元素の分析^{26,27)}
- c) 鼠の腫瘍に対する高速中性子の照射効果^{28,29)}
- d) プロトンと α 粒子の LET の差による生物細胞
 染色に対する照射効果の比較^{30,31)}

1985年頃になり蹴上地区の京都市観光整備に関し て研究施設の移転が建物所有者の京都市から要望され るようになった.検討の結果サイクロトロンを廃棄し 研究施設を京大宇治キャンパスに移転し小型陽子ライ ナックを建設することとなった.

1988 年新建屋が宇治に建設されライナックが設置 された.サイクロトロンは冷却後分解し,磁石と放射 化した部品を宇治に運んだ.蹴上の建物は清掃し,床 のスミヤ法により残留放射能測定を行い安全性確認後 に1990年3月京都市に返還した.この建物は今も京 都市の歴史的建造物として外観は保全され現在の蹴上 発電所の隣に観ることが出来る.

10. あとがき

戦前,戦中の記述については関係者が殆ど物故され ているので正確を欠くかもしれない.筆者は終戦時に 大学の1回生で進駐軍がサイクロトロンの磁石を破 壊するのを目撃した.3回生の時荒勝研究室に配属さ れ,卒業後も研究室に残ることができた.その後サイ クロトロンの建設に参加し,清水,片瀬両氏のもとで 発振器部を担当した.サイクロトロン完成後1956年 に京大を離れた.従ってサイクロトロンによる原子核 物理の研究の詳細につては分からないので柳父教授の レビュー²⁰⁾を参考にした.またサイクロトロンの改 造については改造リポート²¹⁾を参考にした.筆者は 1976年に京大にもどり改造サイクロトロンにより各 種の実験を行った.1990年に蹴上サイクロトロン施 設を閉鎖し,筆者は京大を定年退職した.最近京都大 学総合博物館の地下室に進駐軍によって破壊されたサ イクロトロンのポールチップ一枚が発見された.何故 ポールチップが破壊を免れたかは分からない.

文 献

- 17) J. Gallop, "Notes on a tour of American fixed frequency cyclotron in the automun of 1950", *Medical Research Council, Hammersmith Hospital, London.*
- M. S. Livingston, J. Appl. Phys., 15, 2 (1944) and 15, 128 (1944).
- 19) K. Kimura, Y. Uemura, M. Sonoda, S. Simizu, T. Yanabu, R. Ishiwari, J. Kokame, A. Katase, I. Kumabe, S. Yamasita, H. Takekoshi, K. Miyake, H. Ikegami and H. Fujita, "A 105 cm Fixed Frequency Cyclotron of Kyoto University", *Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University*, **39**, 368 (1951)
- 20) T. Yanabu, "Keage Laboratory of Nuclear Science Decimal Report 1966–1976" Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 55, 74 (1977)
- 21) Y. Uemura, K. Fukunaga, S. Kakigi, T. Yanabu, N. Fujihara, T. Ohsawa, H. Fijita, T. Miyanaga and D. C.

Nguyen, "Improved Kyoto University Cyclotron", Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, **52**, 87 (1974)

Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 55, 74 (1977)

- 22) Y. Iwashita. Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 58, 1 (1980)
- M. Odera, Y. Miyajima, T. Tonuma, N. Hemmi and O. Terajima, *Nucl. Inst. Meth.*, 65, 247 (1968)
- 24) H. Takekoshi, "Laboratory of Nuclear Science Decimal Report, 1978–1988" Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 68, 71 (1990)
- Y. Hayashi, T. Igaki and H. Takekoshi, Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 56, 11 (1978)
- T. Igaki, Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 58, 11 (1980)
- 27) T. Yamada, Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 62, 17 (1984)
- 28) J. Miyajima, et al., Bull. of the Institute for Chemical Research Kyoto University, 57, 147 (1979)
- 29) T. Noishidai, M. Abe, Y. Yukawa, S. Sukawa, J. Miyajima and H. Takekoshi, "Effect of Kyoto Univ.-Cyclotron-induced Fast Neutrons on a Mouse Tumor" *J. Jap. Soc. Cancer Ther.*, 14, 10 (1979)
- 30) T. Takatsuji, H. Takekoshi and M. S. Sasaki, "Induction of Chromosome Aberrations by 4.9 MeV Protons in Human Lymphocytes" *Int. J. Radia. Biol.*, 44, 553 (1983), 45, 2337 (1984)
- 31) T. Takatsuji, M. S. Sasaki and H. Takekoshi, "Effect of Static Magnetic Field on the Induction of Chromosome Aberrations by 4.9 MeV Protons and 23 MeV Alpha Particles" *Int. J. Radiat. Res*, **30**, 238 (1989)